



中等职业学校教学用书(电子技术专业)

# 电子测量仪器与应用 (第2版)

◎李明生 主编



本书配有电子教学参考资料包



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

中等职业学校教学用书（电子技术专业）

# 电子测量仪器与应用

## （第2版）

李明生 主编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书根据 2001 年教育部颁发的中等职业学校电子技术应用专业《电子测量仪器教学基本要求》而修订。

本书主要内容有：电子测量和仪器的基本知识，常用电子测量仪器（电子电压表、信号源、电子示波器、电子计数器、频率特性测试仪、晶体管特性图示仪、万用电桥、Q 表等）的工作原理和基本应用，逻辑分析仪，基于（Based on）计算机的仪器。

本书注意扩宽知识面，理论知识以够用、适度为原则，加强实践环节的要求，并注意介绍新型的电子测量仪器产品。

本书还配有电子教学参考资料包（包括教学指南、电子教案和习题答案），详见前言。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究。

### 图书在版编目（CIP）数据

电子测量仪器与应用/李明生主编. —2 版. —北京：电子工业出版社，2007.4

中等职业学校教学用书. 电子技术专业

ISBN 978-7-121-03907-2

I. 电… II. 李… III. 电子测量设备—专业学校—教材 IV. TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2007）第 024627 号

责任编辑：陈健德 徐 萍

印 刷：北京市海淀区四季青印刷厂

装 订：涿州市桃园装订有限公司

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本：787×1092 1/16 印张：14 字数：358 千字

印 次：2007 年 4 月第 1 次印刷

印 数：5 000 册 定价：19.50 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系电话：（010）68279077；邮购电话：（010）88254888。

质量投诉请发邮件至 [zlt@phei.com.cn](mailto:zlt@phei.com.cn)，盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线：（010）88258888。

## 中等职业学校教材工作领导小组

**组 长：**陈贤忠 安徽省教育厅厅长

**副组长：**李雅玲 信息产业部人事司技术干部处处长

尚志平 山东省教学研究室副主任

睦 平 江苏省教育厅职社处副处长

苏渭昌 教育部职业技术教育中心研究所主任

王传臣 电子工业出版社副社长

**组 员：**(排名不分先后)

唐国庆 湖南省教科院

张志强 黑龙江省教育厅职成教处

李 刚 天津市教委职成教处

王润拽 内蒙古自治区教育厅职成教处

常晓宝 山西省教育厅职成教处

刘 晶 河北省教育厅职成教处

王学进 河南省职业技术教育教学研究室

刘宏恩 陕西省教育厅职成教处

吴 蕊 四川省教育厅职成教处

左其琨 安徽省教育厅职成教处

陈观诚 福建省职业技术教育中心

邓 弘 江西省教育厅职成教处

姜昭慧 湖北省职业技术教育研究中心

李栋学 广西壮族自治区教育厅职成教处

杜德昌 山东省教学研究室职教室

谢宝善 辽宁省基础教育教研培训中心职教部

安尼瓦尔·吾斯曼 新疆维吾尔自治区教育厅职成教处

**秘书长：**李 影 电子工业出版社

**副秘书长：**蔡 葵 电子工业出版社

# 前 言



《电子测量仪器与应用》出版已 6 年,在这 6 年中,电子测量技术与中等职业教育获得了长足的发展。教育部也早于 2001 年颁发了中等职业教育电子技术应用专业《电子测量仪器教学基本要求》。为了适应新形势的要求,根据《电子测量仪器教学基本要求》,我们对本教材做了适当的修订。和原版本相比,新版本具有以下特点:

➤ 采用模块化结构,适应弹性学制的要求。不同学校和不同专业可根据自身条件选择教学内容,只要保证达到基本要求即可。

➤ 理论教学以够用、适度为原则。全书只以组成框图讲清仪器的工作原理;仪器本身的讨论只保证学生能正确操作和使用即可。

➤ 教材编写中注重常用电子测量仪器的讨论,保证学生掌握必备的基本知识和基本技能。

➤ 为了使学生适应新形势的要求,教材适当介绍电子测量仪器的新产品,如数字存储示波器、逻辑分析仪和基于 (Based on) 计算机的仪器等。

➤ 加强实践能力的培养。教材编写中在适当降低理论要求的同时,着重强调电子测量仪器的正确使用及其广泛应用,培养学生的实践能力。

➤ 教材修订过程中,在适当的地方加入“小贴士”部分,为学生接受和掌握教学内容提供一定的帮助。

教材第 6 章(频域测量及其仪器)内容可适当选讲,第 8 章(逻辑分析仪)、第 9 章[基于 (Based on) 计算机的仪器]可以不讲,也可作为科普材料介绍。

本书既可作为中等职业学校电子技术应用及相关专业教材,亦可作为岗位培训用书。

本书由淮安信息职业技术学院李明生和孙敏共同编写。其中,孙敏编写第 2、3、4、5 章并绘制全书的用图,李明生编写第 1、6、7、8、9 章。全书由李明生统稿。

本书在编写过程中参考了扬中市光电仪器厂、南京电讯仪器厂、Tektronix 公司等单位的相关产品技术资料,在此表示感谢。

由于编者的学识和水平有限,本书不当和缺点在所难免,敬请读者批评指正。

为了方便教师教学,本书还配有教学指南、电子教案和习题答案(电子版)。请有此需要的教师登录华信教育资源网([www.huaxin.edu.cn](http://www.huaxin.edu.cn)或[www.hxedu.com.cn](http://www.hxedu.com.cn))免费注册后再进行下载,有问题时请在网站留言板留言或与电子工业出版社联系(E-mail:[hxedu@phei.com.cn](mailto:hxedu@phei.com.cn))。

编 者

2007 年 2 月



# 目 录



<b>第 1 章 电子测量和仪器的基本知识</b> .....	1
1.1 测量及其意义 .....	1
1.2 电子测量的意义、内容和特点 .....	1
1.2.1 电子测量的意义 .....	1
1.2.2 电子测量的内容 .....	2
1.2.3 电子测量的特点 .....	2
1.3 电子测量方法的分类 .....	3
1.3.1 按测量方式分类 .....	3
1.3.2 按被测信号性质分类 .....	3
1.4 测量误差的基本概念 .....	4
1.4.1 测量误差的表示方法 .....	4
1.4.2 测量误差的来源 .....	7
1.4.3 测量误差的分类 .....	7
1.5 测量结果的表示和有效数字 .....	8
1.5.1 测量结果的表示 .....	8
1.5.2 有效数字和有效数字位 .....	8
1.5.3 数字的舍入规则 .....	9
1.6 电子测量仪器的基本知识 .....	9
1.6.1 电子测量仪器的分类 .....	9
1.6.2 电子测量仪器的误差 .....	11
本章小结 .....	11
习题 1 .....	12
<b>第 2 章 信号源</b> .....	13
2.1 概述 .....	13
2.2 正弦信号发生器 .....	13
2.2.1 正弦信号发生器的主要技术指标 .....	14
2.2.2 低频信号发生器 .....	14
2.2.3 高频信号发生器 .....	16
2.2.4 典型产品介绍 .....	17
2.3 合成信号发生器 .....	20
2.3.1 合成信号发生器的主要技术指标 .....	21
2.3.2 合成信号发生器的基本原理 .....	21
2.3.3 典型产品介绍 .....	23

2.4 函数信号发生器 .....	26
2.4.1 函数信号发生器的组成和工作原理 .....	26
2.4.2 典型产品介绍 .....	29
本章小结 .....	30
习题 2 .....	31
<b>第 3 章 电子示波器</b> .....	<b>32</b>
3.1 概述 .....	32
3.2 示波测量的基本原理 .....	33
3.2.1 阴极射线示波管 .....	33
3.2.2 波形显示原理 .....	34
3.3 通用示波器 .....	38
3.3.1 通用示波器的基本组成 .....	38
3.3.2 通用示波器的水平系统 (X 通道) .....	40
3.3.3 通用示波器的垂直系统 (Y 通道) .....	43
3.3.4 多波形显示 .....	45
3.4 典型仪器介绍 .....	47
3.4.1 CALTEK CA8020A 型通用示波器 .....	47
3.4.2 模拟示波器的正确使用 .....	51
3.4.3 示波器的基本操作步骤 .....	52
3.5 数字存储示波器 .....	52
3.5.1 数字存储示波器的特点 .....	52
3.5.2 数字存储示波器的主要技术指标 .....	54
3.5.3 数字存储示波器的组成和工作原理 .....	55
3.5.4 数字存储示波器的显示方式 .....	58
3.5.5 典型产品介绍 .....	59
*3.6 示波器选择的一般原则 .....	64
3.7 示波器的基本测量方法 .....	65
3.7.1 模拟示波器的测量方法 .....	66
3.7.2 数字存储示波器的测量方法 .....	72
本章小结 .....	74
习题 3 .....	75
<b>第 4 章 电子电压表</b> .....	<b>78</b>
4.1 概述 .....	78
4.1.1 电压测量仪器的特点 .....	78
4.1.2 交流电压的基本参数 .....	79
4.2 模拟交流电压表 .....	81
4.2.1 模拟电压表的分类 .....	81
4.2.2 均值电压表 .....	82
4.2.3 峰值电压表 .....	84
4.2.4 有效值电压表 .....	87

4.2.5	典型产品介绍 .....	89
4.3	数字电压表 .....	90
4.3.1	数字电压表的主要技术指标 .....	91
4.3.2	A/D 转换器原理 .....	92
4.3.3	数字电压表中的自动功能 .....	96
4.3.4	典型产品介绍 .....	96
4.4	数字多用表 .....	97
4.4.1	数字多用表的特点 .....	97
4.4.2	数字多用表的基本组成 .....	97
4.4.3	测量电路 .....	98
4.4.4	典型产品介绍 .....	100
4.5	电压表的选择和正确使用 .....	101
4.5.1	电压表的选择 .....	101
4.5.2	电压表的正确使用 .....	102
	本章小结 .....	103
	习题 4 .....	103
<b>第 5 章</b>	<b>电子计数器</b> .....	<b>105</b>
5.1	概述 .....	105
5.2	通用电子计数器的基本组成 .....	106
5.3	电子计数器的主要技术性能 .....	108
5.4	通用电子计数器的测量原理 .....	109
5.4.1	测量频率 .....	109
5.4.2	测量周期 .....	110
5.4.3	测量频率比 .....	111
5.4.4	测量时间间隔 .....	111
5.4.5	累加计数 .....	112
5.4.6	自校(自检) .....	113
5.5	电子计数器的测量误差 .....	113
5.5.1	误差来源 .....	113
5.5.2	频率测量误差分析 .....	114
5.5.3	周期测量误差分析 .....	115
5.6	通用电子计数器典型产品介绍 .....	116
5.6.1	E312A 型通用电子计数器 .....	116
*5.6.2	E312B 型通用电子计数器 .....	120
	本章小结 .....	126
	习题 5 .....	126
<b>第 6 章</b>	<b>频域测量及其仪器</b> .....	<b>128</b>
6.1	概述 .....	128
6.2	线性系统频率特性的测量 .....	128
6.2.1	频率特性测试仪的工作原理 .....	129



6.2.2	频率特性测试仪典型产品介绍 .....	132
6.3	频谱分析仪 .....	135
6.3.1	引言 .....	135
6.3.2	扫频外差式频谱分析仪 .....	136
6.3.3	频谱分析仪的主要工作特性 .....	136
6.3.4	频谱分析仪典型产品介绍 .....	137
6.4	谐波失真度的测量 .....	140
6.4.1	谐波失真度的定义 .....	141
6.4.2	基波抑制法的测量原理 .....	141
6.4.3	失真度测量仪的误差 .....	142
6.4.4	失真度测量仪典型产品介绍 .....	142
6.4.5	白噪声法测量谐波失真度 .....	145
	本章小结 .....	146
	习题 6 .....	146
<b>第 7 章</b>	<b>电子器件参数和特性测量仪器</b> .....	<b>148</b>
7.1	电子器件参数和特性测量仪器 .....	148
7.1.1	电子器件参数测量仪器的分类 .....	148
7.1.2	晶体管特性曲线的测量 .....	149
7.1.3	晶体管特性图示仪 .....	151
7.1.4	晶体管特性图示仪典型产品介绍 .....	155
7.2	集总参数阻抗的测量 .....	159
7.2.1	集总参数元件简介 .....	159
7.2.2	电桥法 .....	161
7.2.3	ZL-6 型 LCR 自动测量仪 .....	166
7.2.4	谐振法 .....	167
	本章小结 .....	172
	习题 7 .....	173
<b>第 8 章</b>	<b>逻辑分析仪</b> .....	<b>175</b>
8.1	数据域分析的基本知识 .....	175
8.1.1	数据域分析的基本概念 .....	175
8.1.2	数字信号的特点 .....	176
8.2	逻辑分析仪的基本组成、功能及其应用 .....	177
8.2.1	逻辑分析仪的基本组成 .....	178
8.2.2	逻辑分析仪的功能 .....	178
8.2.3	逻辑分析仪与电子示波器的比较 .....	182
8.2.4	逻辑分析仪的工作过程 .....	183
8.2.5	逻辑分析仪的应用 .....	183
	本章小结 .....	186
	习题 8 .....	186
<b>第 9 章</b>	<b>基于 (Based on) 计算机的仪器</b> .....	<b>187</b>

9.1	概述 .....	187
9.2	智能仪器 .....	188
9.2.1	智能仪器的基本组成 .....	188
9.2.2	智能仪器工作举例 .....	189
9.3	虚拟仪器 .....	191
9.3.1	虚拟仪器的特点 .....	191
9.3.2	虚拟仪器的硬件组成 .....	192
9.3.3	虚拟仪器的软件结构 .....	194
9.3.4	典型产品介绍 .....	195
9.4	自动测试系统 .....	197
9.4.1	自动测试系统的基本组成 .....	197
9.4.2	GPIB 总线系统 .....	198
9.4.3	VXI 总线系统 .....	201
9.5	网络化仪器 .....	205
9.5.1	网络化仪器的特点 .....	205
9.5.2	现场总线系统 .....	206
	本章小结 .....	209
	习题 9 .....	209
	<b>参考文献</b> .....	210

注：标\*部分为选修内容。

# 第1章 电子测量和仪器的基本知识



## 学习目标

- 了解电子测量的内容、特点和基本方法。
- 了解测量误差的来源与分类。
- 掌握测量误差的表示方法。
- 了解电子测量仪器的分类及仪器误差的表示方法。
- 理解有效数字的概念，会对测量结果进行简单的数据处理。

## 1.1 测量及其意义

测量是人类对客观事物取得数量概念的认识过程。在这种认识过程中，人们借助于专门的设备，依据一定的理论，通过实验的方法，求出以所用测量单位来表示的被测量的量值或确定一些量值的依从关系。

通常，测量结果的量值由两部分组成：数值（大小及符号）和相应的单位名称。没有单位的量值是没有物理意义的。

一般地说，测量是一种比较过程，把被测的量与同种类的作为单位的量，通过一定的测量方法进行比较，以确定被测量是该单位的若干倍。

在科学技术的发展过程中，测量结果不仅用于验证理论，而且是发现新问题、提出新理论的依据。历史事实证明：科学的进步、生产的发展与测量理论技术手段的发展和进步是相互依赖、相互促进的。测量手段的现代化，已被公认是科学技术和生产现代化的重要条件和明显标志。

## 1.2 电子测量的意义、内容和特点

### 1.2.1 电子测量的意义

随着测量学的发展和无线电电子学的应用，诞生了以电子技术为手段的测量，即电子测量。

电子测量涉及极宽频率范围内所有电量、磁量以及各种非电量的测量。目前，电子测量不仅因为其应用广泛而成为现代科学技术中不可缺少的手段，同时也是一门发展迅速、对现代科学技术的发展起着重大推动作用的独立学科。从某种意义上说，近代科学技术的水平是由电子测量的水平来保证和体现的；电子测量的水平，是衡量一个国家科学技术水平的重要标志之一。



### 1.2.2 电子测量的内容

本课程中电子测量的内容是指对电子学领域内电参量的测量，主要有以下几个方面。

(1) 电能量的测量，如电流、电压、功率等的测量。

(2) 电路、元器件参数的测量，如电阻、电感、电容、阻抗的品质因数、电子器件参数等的测量。

(3) 电信号特性的测量，如频率、波形、周期、时间、相位、谐波失真度、调幅度及逻辑状态等的测量。

(4) 电路性能的测量，如放大倍数、衰减量、灵敏度、通频带、噪声指数等的测量。

(5) 特性曲线的显示，如幅频特性、器件特性等的显示。

上述各种待测参数中，频率、电压、时间、阻抗等是基本电参数，对它们的测量是其他许多派生参数测量的基础。

另外，通过传感器，可将很多非电量如温度、压力、流量、位移等转换成电信号后进行测量，但这不属于本书讨论的范围。

### 1.2.3 电子测量的特点

同其他的测量相比，电子测量具有以下几个突出的优点。

#### 1. 测量频率范围宽

电子测量除测量直流电量外，还可以测量交流电量，其频率范围可低至  $10^{-4}\text{Hz}$ ，高至  $10^{12}\text{Hz}$  左右。但应注意，在不同的频率范围内，即使测量同一种电量，所需要采用的测量方法和使用的测量仪器也往往不同。

#### 2. 仪器量程宽

量程是仪器所能测量各种参数的范围。电子测量仪器具有相当宽广的量程。例如，一台数字电压表可以测出从纳伏（nV）级至千伏（kV）级的电压，其量程达 12 个数量级；一台用于测量频率的电子计数器，其量程可达 17 个数量级。

#### 3. 测量准确度高

电子测量的准确度比其他测量方法高得多，特别是对频率和时间的测量，误差可减小到  $10^{-13}$  量级，是目前人类在测量准确度方面达到的最高指标。电子测量的准确度高，是它在现代科学技术领域得到广泛应用的重要原因之一。

#### 4. 测量速度快

由于电子测量是通过电磁波的传播和电子运动来进行的，因而可以实现测量过程的高速度，这是其他测量所不能比拟的。只有测量的高速度，才能测出快速变化的物理量。这对于现代科学技术的发展具有特别重要的意义。例如，原子核的裂变过程、导弹的发射速度、人造卫星的运行参数等的测量，都需要高速度的电子测量。

#### 5. 易于实现遥测

电子测量的一个突出优点是可以通过各种类型的传感器实现遥测。例如，对于遥远距离或环境恶劣的、人体不便于接触或无法达到的区域（如深海、地下、核反应堆内、人造卫星



等), 可通过传感器或通过电磁波、光、幅射等方式进行测量。

## 6. 易于实现测量自动化和测量仪器微机化

由于大规模集成电路和微型计算机的应用, 使电子测量出现了崭新的局面。例如, 在测量中能实现程控、自动量程转换、自动校准、自动诊断故障和自动修复, 对于测量结果可以自动记录、自动进行数据运算、分析和处理。目前已出现了许多类型带微处理器的自动化示波器、数字频率计、数字电压表以及受计算机控制的自动化集成电路测试仪、自动网络分析仪和其他自动测试系统。

电子测量的一系列优点, 使它获得极其广泛的应用。今天, 几乎找不到哪一个科学技术领域没有应用电子测量技术的。大到天文观测、宇宙航天, 小到物质结构、基本粒子, 从复杂的生命、遗传问题到日常的工农业生产、商业部门, 都越来越多地采用了电子测量技术与设备。

## 1.3 电子测量方法的分类

一个电参量的测量可以通过不同的方法来实现。电子测量方法的分类形式有多种, 这里仅就最常用的分类方法做简要介绍。

### 1.3.1 按测量方式分类

#### 1. 直接测量

用预先按已知标准量定度好的测量仪器, 对某一未知量直接进行测量, 从而得到被测量值的测量方法称为直接测量。例如, 用通用电子计数器测频率, 用电压表测量电路中的电压, 都属于直接测量。

#### 2. 间接测量

对一个与被测量有确定函数关系的物理量进行直接测量, 然后通过代表该函数关系的公式、曲线或表格, 求出被测量值的方法, 称为间接测量。例如, 要测量已知电阻  $R$  上消耗的功率, 先测量加在  $R$  两端的电压  $U$ , 然后再根据公式  $P=U^2/R$  求出功率  $P$  之值。

#### 3. 组合测量

在某些测量中, 被测量与几个未知量有关, 测量一次无法得出完整的结果, 则可改变测量条件进行多次测量, 然后按被测量与未知量之间的函数关系组成联立方程, 求解, 得出有关未知量。此种测量方法称为组合测量, 它是一种兼用直接测量与间接测量的方法。

上面介绍的三种方法中, 直接测量的优点是测量过程简单迅速, 在工程技术中采用得比较广泛。间接测量多用于科学实验, 在生产及工程技术中应用较少, 只有当被测量不便于直接测量时才采用。至于组合测量, 是一种特殊的精密测量方法, 适用于科学实验及一些特殊的场合。

### 1.3.2 按被测信号性质分类

#### 1. 时域测量

时域测量是测量被测对象在不同时间的特性, 这时把被测信号看成一个时间的函数。例



如,使用示波器显示被测信号的瞬时波形,测量它的幅度、宽度、上升和下降沿等参数。时域测量还包括一些周期性信号的稳态参量的测量,如正弦交流电压,虽然它的瞬时值会随时间变化,但是交流电压的振幅值和有效值是稳态值,可用指针式仪表测量。

## 2. 频域测量

频域测量是测量被测对象在不同频率时的特性,这时把被测对象看成一个频率的函数。信号通过非线性电路会产生新的频率分量,能用频谱分析仪进行分析。放大器的幅频特性,可用频率特性图示仪予以显示。放大器对不同频率的信号会产生不同的相移,可使用相位计测量放大器的相频特性。

## 3. 数据域测量

数据域测量是对数字系统逻辑特性进行的测量。利用逻辑分析仪能够分析离散信号组成的数据流,可以观察多个输入通道的并行数据,也可以观察一个通道的串行数据。

## 4. 随机测量

随机测量是利用噪声信号源进行动态测量,如各类噪声、干扰信号等。这是一种比较新的测量技术。

电子测量技术还有许多分类方法,如动态与静态测量技术、模拟和数字测量技术、实时与非实时测量技术、有源与无源测量技术等。

# 1.4 测量误差的基本概念

测量的目的就是希望获得被测量的实际大小,即真值。所谓真值,就是在一定的时间和环境条件下,被测量本身所具有的真实数值。实际上,由于测量设备、测量方法、测量环境和测量人员的素质等条件的限制,测量所得到的结果与被测量的真值之间会有差异,这个差异就称为测量误差。测量误差过大,可能会使得测量结果变得毫无意义,甚至会带来坏处。研究误差的目的,就是要了解产生误差的原因和误差发生的规律,寻求减小测量误差的方法,使测量结果精确可靠。

## 1.4.1 测量误差的表示方法

测量误差有两种表示方法:绝对误差和相对误差。

### 1. 绝对误差

(1) 定义:由测量所得到的被测量值  $x$  与其真值  $A_0$  之差,称为绝对误差,即

$$\Delta x = x - A_0 \quad (1-1)$$

由于测量结果  $x$  总含有误差, $x$  可能比  $A_0$  大,亦可能比  $A_0$  小,因此  $\Delta x$  既有大小,又有正负符号。其量纲和测量值相同。



### 注意

这里说的被测量值,是指仪器的示值。一般情况下,示值和仪器的读数有区别。读数是直接从仪器刻度盘、显示器等读数装置上直接读到的数字,示值是该读数表示的被测量的量值,



常常需要加以换算。

式(1-1)中,  $A_0$  表示真值。真值是一个理想的概念, 一般来说, 是无法精确得到的。因此, 实际应用中通常用实际值  $A$  来代替真值  $A_0$ 。

实际值又称为约定真值, 它是根据测量误差的要求, 用高一等级或数级的标准仪器或计量器具测量所得之值, 这时绝对误差可按下式计算:

$$\Delta x = x - A \quad (1-2)$$

(2) 修正值: 与绝对误差的绝对值大小相等, 但符号相反的量值, 称为修正值, 用  $c$  表示。

$$c = -\Delta x = A - x \quad (1-3)$$

对测量仪器进行定期检定时, 用标准仪器与受检仪器相对比, 以表格、曲线或公式的形式给出受检仪器的修正值。在日常测量中, 使用该受检仪器测量所得到的结果应加上修正值, 以求得被测量的实际值, 即

$$A = x + c \quad (1-4)$$

## 2. 相对误差

绝对误差虽然可以说明测量结果偏离实际值的情况, 但不能确切反映测量的准确程度, 不便于看出对整个测量结果的影响。例如, 对分别为 10Hz 和 1MHz 的两个频率进行测量, 绝对误差都为 +1Hz, 但两次测量结果的准确程度显然不同。因此, 除绝对误差外, 再给出相对误差的定义。

绝对误差与被测量的真值之比, 称为相对误差 (或称相对真误差), 用  $\gamma$  表示, 即

$$\gamma = \frac{\Delta x}{A_0} \times 100\% \quad (1-5)$$

相对误差没有量纲, 只有大小及符号。由于真值是难以确切得到的, 因此通常用实际值  $A$  代替真值  $A_0$  来表示相对误差, 称为实际相对误差, 用  $\gamma_A$  表示:

$$\gamma_A = \frac{\Delta x}{A} \times 100\% \quad (1-6)$$

在误差较小、要求不大严格的场合, 也可用测量值  $x$  代替实际值  $A$ , 由此得出示值相对误差, 用  $\gamma_x$  表示:

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (1-7)$$

式中,  $\Delta x$  由所用仪器的准确度等级定出。由于  $x$  中含有误差, 所以  $\gamma_x$  只适用于近似测量。当  $\Delta x$  很小时,  $x \approx A$ ,  $\gamma_x \approx \gamma_A$ 。

通常也用绝对误差与仪器满刻度值  $x_m$  之比来表示相对误差, 称为引用相对误差 (或称满度相对误差), 用  $\gamma_m$  表示:

$$\gamma_m = \frac{\Delta x}{x_m} \times 100\% \quad (1-8)$$

测量仪器使用最大引用相对误差来表示它的准确度, 这时有:

$$\gamma_{mm} = \frac{\Delta x_m}{x_m} \times 100\% \quad (1-9)$$

式中  $\Delta x_m$ ——仪器在该量程范围内出现的最大绝对误差;

$x_m$ ——满刻度值;

$\gamma_{mm}$ ——仪器在工作条件下不应超过的最大相对误差,它反映了该仪表综合误差的大小。

电工测量仪表按  $\gamma_{mm}$  值分 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0 七级。1.0 级表示该仪表的最大引用相对误差不会超过  $\pm 1.0\%$ , 但超过  $\pm 0.5\%$ , 也称准确度等级为 1.0 级。准确度等级常用符号  $S$  表示。

**【例 1.1】** 两个电压的实际值分别为  $U_{1A}=100V$ ,  $U_{2A}=10V$ ; 测量值分别为  $U_{1x}=98V$ ,  $U_{2x}=9V$ 。求两次测量的绝对误差和相对误差。

解:  $\Delta U_1 = U_{1x} - U_{1A} = 98 - 100V = -2V$

$$\Delta U_2 = U_{2x} - U_{2A} = 9 - 10V = -1V$$

$|\Delta U_1| > |\Delta U_2|$ , 两者的相对误差分别为:

$$\gamma_{A1} = \frac{\Delta U_1}{U_{1A}} = -\frac{2}{100} \times 100\% = -2\%$$

$$\gamma_{A2} = \frac{\Delta U_2}{U_{2A}} = -\frac{1}{10} \times 100\% = -10\%$$

$|\gamma_{A1}| < |\gamma_{A2}|$ , 说明  $U_2$  的测量准确度低于  $U_1$ 。

**【例 1.2】** 已知某被测电压为 80V, 用 1.0 级、100V 量程的电压表测量。若只做一次测量就把该测量值作为测量结果, 则可能产生的最大绝对误差是多少?

解: 在实际生产过程中, 经常将一次直接测量的结果作为最终结果, 所以讨论这个问题很具有实践意义。仪表的准确度等级表示该仪表的最大引用相对误差, 该仪表可能出现的最大绝对误差为:

$$\Delta x_m = \pm 1.0\% \times 100 = \pm 1V$$

由式 (1-9) 可知, 测量的绝对误差满足:

$$\Delta x \leq x_m \times S\%$$

$$\gamma_x \leq (x_m \times S\%) / x$$

式中  $S$ ——仪表的准确度等级。

测量中总要满足  $x \leq x_m$ , 可见当仪表的准确度等级确定后,  $x$  越接近  $x_m$ , 测量的示值相对误差就越小, 测量准确度越高。因此, 在测量中选择仪表量程时, 应使指针尽量接近满偏转, 一般最好指示在满度值 2/3 以上的区域。应该注意, 这个结论只适用于正向线性刻度的电压表、电流表等类型的仪表。

对于反向刻度的仪表即随着被测量数值增大而指针偏转角度变小的仪表, 如万用表的欧姆挡, 由于在设计或检定仪表时均以中值电阻为基准, 故在使用这类仪表进行测量时应尽可能使表针指在中心位置附近区域, 因为此时测量准确度最高。

**【例 1.3】** 被测电压的实际值在 10V 左右, 现有量程和准确度等级分别为 150V、0.5 级和 15V、1.5 级两块电压表。问用哪块表测量比较合适?

解: 若用 150V、0.5 级电压表, 由式 (1-9) 可求得测量的最大绝对误差为:

$$\Delta x_{m1} = \pm 0.5\% \times 150 = \pm 0.75V$$

示值范围为  $(10 \pm 0.75)V$ , 则测量的相对误差为:





$$\gamma_{A1} = \frac{\pm 0.75}{10} \times 100\% = \pm 7.5\%$$

用 15V、1.5 级电压表测量, 可得:

$$\Delta x_{m2} = \pm 1.5\% \times 15 = \pm 0.225V$$

示值范围为  $(10 \pm 0.225)V$ , 则测量的相对误差为:

$$\gamma_{A2} = \frac{\pm 0.225}{10} \times 100\% = \pm 2.25\%$$

显然, 应选用 15V、1.5 级电压表测量。

由此例可见, 测量中应根据被测量的大小, 合理选择仪表量程, 并兼顾准确度等级, 而不能片面追求仪表的准确度级别。

## 1.4.2 测量误差的来源

如前所述, 在一切实际测量中都存在一定的误差。下面讨论误差的来源。

### 1. 仪器误差

由于仪器本身及其附件的电气和机械性能不完善而引入的误差称为仪器误差。仪器仪表的零点漂移、刻度不准确和非线性等引起的误差, 以及数字式仪表的量化误差都属于此类误差。

### 2. 理论误差和方法误差

由于测量所依据的理论不够严密或用近似公式、近似值计算测量结果所引起的误差称为理论误差。例如, 峰值检波器的输出电压总是小于被测电压峰值所引起的峰值电压表的误差就属于理论误差。

由于测量方法不适宜而造成的误差称为方法误差。例如, 用低内阻的万用表测量高内阻电路的电压时所引起的误差就属于此类误差。

### 3. 影响误差

由于温度、湿度、振动、电源电压、电磁场等各种环境因素与仪器仪表要求的条件不一致而引起的误差称为影响误差。

### 4. 人身误差

由于测量人员的分辨力、视觉疲劳、不良习惯或缺乏责任心等因素引起的误差称为人身误差, 如读错数字、操作不当等。

## 1.4.3 测量误差的分类

根据性质, 可将测量误差分为系统误差、随机误差和疏失误差。

### 1. 系统误差

在一定的条件下, 误差的数值 (大小及符号) 保持恒定或按照一定的规律变化的误差称为系统误差。

系统误差决定了测量的准确度。系统误差越小, 测量结果越准确。